

四种典型球墨铸铁应变释放系数及其塑性修正研究

汪友路¹, 钱冬冬², 刘爱军¹, 解明国², 张学斌¹

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009;

2. 安徽合力股份有限公司合肥铸锻厂, 安徽合肥 230601)

摘要: 盲孔法是工程中测量残余应力最普遍的方法, 其中材料的应变释放系数是该方法中的关键参数, 目前国内外对球墨铸铁的应变释放系数研究相对较少。本文采用盲孔法对四种常用球墨铸铁QT450-10、QT550-6、QT600-3和QT700-4的应变释放系数进行了标定, 得到应变释放系数与应力的关系曲线, 发现低牌号的球墨铸铁由于铁素体含量多, 对应力集中更为敏感, 在标定试验中易产生局部的塑性变形。使用基于形状改变比能 S 的修正方法对四种球墨铸铁的应变释放系数进行修正, 发现和其他均质金属材料不同, 球墨铸铁应变释放系数与 $\sqrt{S}$ 之间存在良好的线性关系, 因此提出了球墨铸铁应变释放系数关于 $\sqrt{S}$ 的修正公式, 可直接应用于盲孔法测量球墨铸铁的残余应力。

关键词: 球墨铸铁; 应变释放系数; 盲孔法; 残余应力; 塑性修正

作者简介:

汪友路(1998-), 男, 硕士, 主要研究方向: 金属材料及表面工程。E-mail: wangylhi@163.com

通讯作者:

张学斌, 男, 博士, 副研究员。E-mail: zzhhxabb@126.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

07-1017-07

基金项目:

国家重点研发计划“网络协同制造和智能工厂”重点专项(2020YFB1710100)。

收稿日期:

2023-09-12 收到初稿,

2023-12-23 收到修订稿。

球墨铸铁是铸铁的一种, 它具有优良性能, 广泛应用于许多对强度、耐磨性等性能要求较高的场合^[1-2], 例如各种车床、铣床的主轴等。球墨铸铁产品在生产及使用过程中, 都会在其内部产生残余应力, 这就会影响产品使用精度和使用安全^[3-4]。因此对于残余应力的测量十分重要。目前对于残余应力的测量方法已有很多, 其中全破坏性方法如截条法, 半破坏性方法如盲孔法等, 非破坏性方法包括X射线法、磁测法等^[5]。非破坏性方法尽管对构件基本无损坏, 但测量成本较高, 需要特定设备, 无法现场测量。相较于全破坏性方法, 盲孔法只需在构件上钻一个小孔, 测试过后的构件在大多数情况下仍可继续使用。盲孔法操作简单, 测试设备便携, 可现场使用等诸多优点^[6-7]。因此, 在工程实际中取得广泛应用^[8-11]。

盲孔法测量残余应力过程中, 需要预先对材料本身的应变释放系数进行标定, 然后将钻孔得到的构件释放应变代入公式, 计算出构件在测量处的残余应力^[12]。目前, 灰铸铁及钢的应变释放系数已有初步的研究和标定^[13-14], 但是, 对于球墨铸铁, 相关研究很少见到报道。

因此, 本文选取QT450-10、QT550-6、QT600-3和QT700-4四种具有代表性的球墨铸铁, 使用盲孔法标定了材料本身的应变释放系数, 研究了不同牌号球墨铸铁标定过程中孔边塑性变形对材料应变释放系数的影响, 同时也对标定得到的应变释放系数进行塑性修正, 得到上述材料的应变释放系数计算公式, 这些计算结果, 可以直接应用于相关球墨铸铁件残余应力的测量。因此本文的工作对于球墨铸铁残余应力的盲孔法精确测量及研究具有显著的工程意义。

1 盲孔法测量残余应力及标定应变释放系数的原理

1.1 测量残余应力的原理^[15]

若零件内部存在残余应力 σ , 在零件上的待测点处钻一个盲孔(孔径 d , 孔深

h), 盲孔周围的残余应力得到释放, 并产生释放应变 ε , 再将 ε 代入公式 (1), 即可计算出该点残余应力。通常使用应变花测量释放应变 ε , 图1为测量残余应力的应变花。

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{1}{4A} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \\ \sigma_2 = \frac{1}{4A} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \\ \tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为最大、最小主应力; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为1号、2号、3号应变片测得的释放应变; θ 为 σ_1 与1号应变片之间的夹角; A 、 B 为材料的应变释放系数; E 为材料的弹性模量。

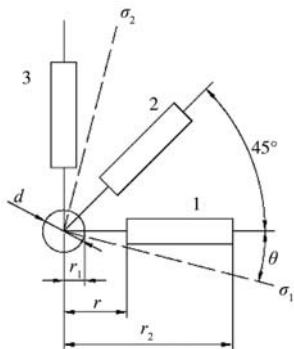


图1 应变花示意图

Fig. 1 Schematic of strain gauge

1.2 标定应变释放系数的原理

由公式 (1) 可见, 应变释放系数 A 、 B 值的准确标定, 对于盲孔法测试非常关键, A 、 B 值与盲孔尺寸以及材料本身的力学性能有关, 在通孔情况下, 应变释放系数 A 、 B 值可由Kirsch理论^[16]直接求得:

$$\begin{cases} A = -\frac{1}{2E} \left[(1+\nu) \frac{d^2}{4r_m^2} \right] \\ B = \frac{1}{2E} \left[3(1+\nu) \frac{d^4}{16r_m^4} - \frac{d^2}{r_m^2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

盲孔法的应变释放系数则需要通过试验标定, 应变片1、3分别与 σ_1 、 σ_2 方向一致, 此时 $\theta=0$, 标定时施加单向应力场 ($\sigma_1=\sigma$, $\sigma_2=0$), 代入公式 (1) 可得到如下公式:

$$\begin{cases} A = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{2\sigma} \\ B = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{2\sigma} \end{cases} \quad (3)$$

因此, 根据1、3应变片采集的应变 ε_1 、 ε_3 即可求得应变释放系数 A 、 B 值。

2 标定试验及修正

2.1 试验设备

应变花型号为BFH120-3CA-D150型免焊接三向应变花, 电阻值120 Ω , 灵敏系数 $(2.0 \pm 1)\%$; 应变仪及相关测试软件为某公司的DH5922N动态信号测试分析系统。

拉伸设备为MTSLandmark 370.25电液伺服金属疲劳试验机, 最大加载载荷250 kN, 加载频率0~50 Hz; 钻孔设备为某公司的便携式高速钻机 (最大转速可达90 000 rpm) 和配套的圆柱形铣刀 (刃径2 mm), 选用高速钻机及圆柱形铣刀的目的就是降低钻孔对孔边造成的切削应力, 从而减小给试验结果带来的误差。

2.2 试验方案及过程

根据国家标准GB/T 31310—2014《金属材料残余应力测定钻孔应变法》, QT450-10、QT550-6、QT600-3和QT700-4应变释放系数标定试样的尺寸如图2所示。

根据国家标准GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第一部分: 室温试验方法》, 在MTS试验机上对上述四个牌号球墨铸铁材料的拉伸性能进行检测, 拉伸速度为0.5 mm/min, 检测结果均为3根试样的平均值 (表1)。根据国家标准GB/T 22315—2008《金属材料弹性模量和泊松比试验方法》, 使用静态法得到材料在弹性变形区间的应力应变关系, 计算出材料的弹性

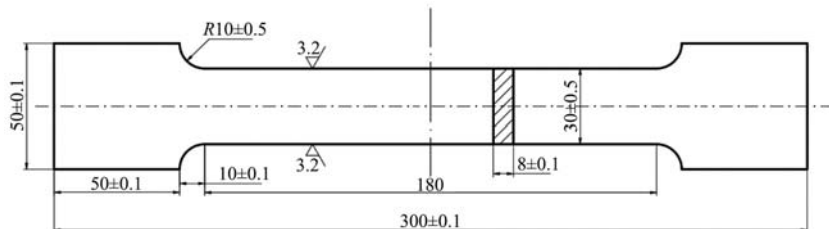


图2 系列典型球墨铸铁应变释放系数标定试样示意图

Fig. 2 Schematic of series typical ductile iron strain release coefficient calibration

表1 系列典型球墨铸铁试样拉伸性能
Table 1 Tensile properties of series typical ductile iron sample

牌号	弹性模量/GPa	泊松比 ν	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
QT450-10	162.613	0.275	464	314	16
QT550-6	167.934	0.275	552	359	9.5
QT600-3	165.472	0.275	622	372	6.5
QT700-4	158.787	0.275	708	427	4

模量及泊松比(表1)。

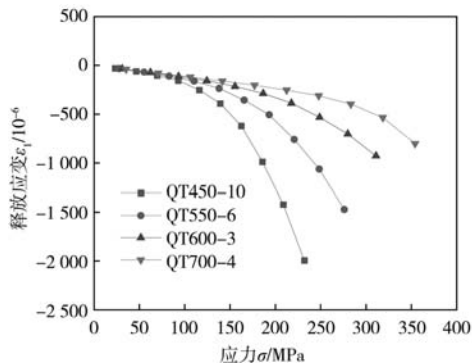
在标定试样上粘贴应变花,粘贴前需将试样待测的表面用砂纸打磨,除去锈迹及氧化层,并使表面粗糙以便粘贴。用划针在表面划出待粘贴应变花的位置,用酒精将试样表面清洗干净,去除残留的金属粉末。在划针标记位置滴一滴502胶,将应变花平整地粘贴在试样表面,尽量保证1号应变片与拉伸方向一致,按照国家标准GB/T 31310—2014,在标定试样中心粘贴一个应变花记录应变,在其两侧粘贴监视电阻应变花,使其读数差值小于5%。本文选用免焊接应变花,简化了粘贴应变花的操作,应变花外接导线被绝缘胶皮包覆,将导线粘贴在试样表面。

将准备好应变片的标定试样安装在MTS试验机

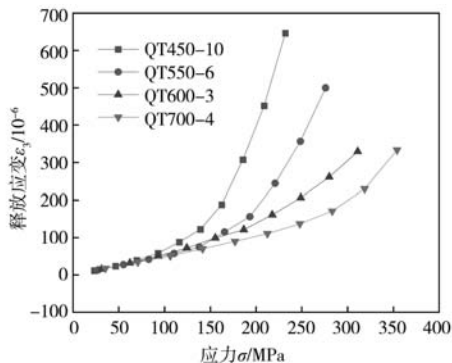
上,将应变片的导线与应变仪相连接。每个牌号的加载力设置十个等级,最小加载应力为 $0.1\sigma_b$,最大加载应力为 $0.5\sigma_b$,不超过材料的屈服强度。由应变仪采集拉伸过程中的应力应变曲线;加载完成后将试样取下,使用便携式高速钻机和圆柱形铣刀在应变花中心位置钻盲孔($\Phi 2\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$),完成钻孔后再次将试样安装在MTS试验机上进行拉伸,拉伸载荷和过程与钻孔前一致,同时仍用应变仪采集拉伸钻孔过程中的应力应变曲线。

2.3 试验结果

标定完成后可以测得试样的应力应变数据,图3为计算得到系列典型球墨铸铁释放应变与应力的关系。



(a) 释放应变 ε_1



(b) 释放应变 ε_3

图3 系列典型球墨铸铁释放应变与应力的关系

Fig. 3 Relationship between stress and release strain of series typical ductile iron

将采集到的各应力等级下的应变值 ε_1 、 ε_3 代入公式(3),计算出各等级应变值下的应变释放系数 A 、 B 。图4为系列典型球墨铸铁应变释放系数与应力的关系。

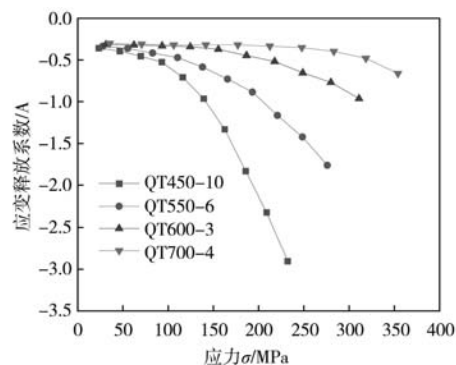
在弹性变形阶段,材料的应变释放系数是一个定值,基本不随应力变化而变化,进入塑性变形阶段,应变释放系数开始随应力增大而减小。图4中低牌号球墨铸铁QT450-10以及QT550-6应变释放系数基本不随应力变化,而高牌号球墨铸铁QT600-3以及QT700-4应变释放系数在一定应力区间内基本保持不变,随后进入塑性变形阶段。这就给 A 、 B 值的选择使用带来困难,

因此需要对上述系列典型球墨铸铁应变释放系数进行修正。

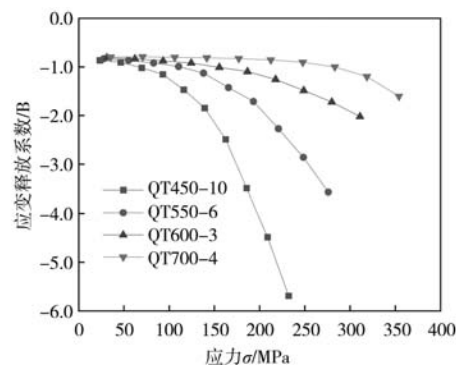
2.4 塑性修正

目前对于孔边塑性修正的方法有很多,本文选用基于形状改变比能 S 的应变释放系数修正方法^[17],以形状改变比能 S 作为判断依据,通过数值拟合得到形状改变比能 S 的应变释放系数修正公式。

首先对孔边的屈服条件进行判断,Mises屈服准则是指物体中某一点的应力状态达到一数值时,材料就



(a) 应变释放系数A



(b) 应变释放系数B

图4 系列典型球墨铸铁应变释放系数与应力的关系

Fig. 4 Relationship between stress and strain release coefficient of series typical ductile iron

会发生屈服, 在研究盲孔法测量残余应力的过程中, 只考虑平面应力问题, Mises屈服条件^[18]可表示为:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_s^2 \quad (4)$$

根据广义胡克定律^[18]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{(\sigma_1 - \nu \sigma_2)}{E} \\ \varepsilon_3 = \frac{(\sigma_2 - \nu \sigma_1)}{E} \end{cases} \quad (5)$$

代入式(4)中, 则式(4)的左边部分可表示为:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = S \left[\frac{E}{(1-\nu^2)} \right]^2 \quad (6)$$

$$S = (1 + \nu^2 - \nu) (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_3) - (1 + \nu^2 - 4\nu) \varepsilon_1 \varepsilon_3 \quad (7)$$

结合材料力学中形状改变比能理论, 可知S反映的是在相应应力(应变)状态下形状改变比能的大小^[17]。当S达到极限数值时, 孔边即开始发生塑性变形。

将试验数据代入式(7), 计算出各级应力下的形状改变比能S。图5是各牌号球墨铸铁形状改变比能S与应力σ间的关系, 从图中看出, 形状改变比能S随应力σ增大而增大, 二者成近似指数关系。其中QT450-10的

形状改变比能S最大值为 348.429×10^{-8} , 大于其他牌号的形状改变比能S最大值, 说明QT450-10孔边塑性变形最为明显。

根据图4及图5应变释放系数及形状改变比能S与应力σ间的关系, 得到应变释放系数A、B与形状改变比能S间的关系, 如图6所示。可以看出, 球墨铸铁应变释放系数A、B会随着形状改变比能S的增加而呈近似幂指数关系的降低, 而且, 球墨铸铁强度越高, 幂指数关系越接近直线。在文献[8]中, QT700-4的形状改变比能S与应变释放系数A、B的关系就是按照直线处理的。

实际上, 对于均质金属材料来说, 其应变释放系数与形状改变比能S之间都符合线性关系^[19-21], 因此可以通过数值拟合得到其应变释放系数关于形状改变比能S的修正公式:

$$\begin{cases} A = -(\alpha_A + \beta_A S) \\ B = -(\alpha_B + \beta_B S) \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_A 、 β_A 及 α_B 、 β_B 由数值拟合得到。

但是, 对于基体内分布有球形石墨的球墨铸铁来说, 在应变释放系数的标定试验中, 盲孔及球形石墨周围都存在应力集中, 因此局部应力很容易超过基体的屈服强度, 发生塑性变形, 使S和A、B关系偏离直线, 这在铁素体含量高的球墨铸铁中体现得尤为明显。但同时可以发现, 球墨铸铁的应变释放系数与 $\sqrt{S}$ 间呈线性关系, 如图7所示。

通过数值拟合可以得到应变释放系数关于 $\sqrt{S}$ (10^{-4})的修正公式(9)-(12), 其中QT600-3的应变释放系数A以及QT700-4的应变释放系数A、B需要进行分段处理。

QT450-10:

$$\begin{cases} A = -0.1432\sqrt{S} - 0.3724 \\ B = -0.2702\sqrt{S} - 0.8198 \end{cases} \quad (9)$$

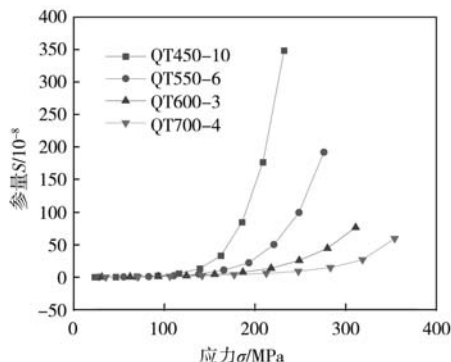
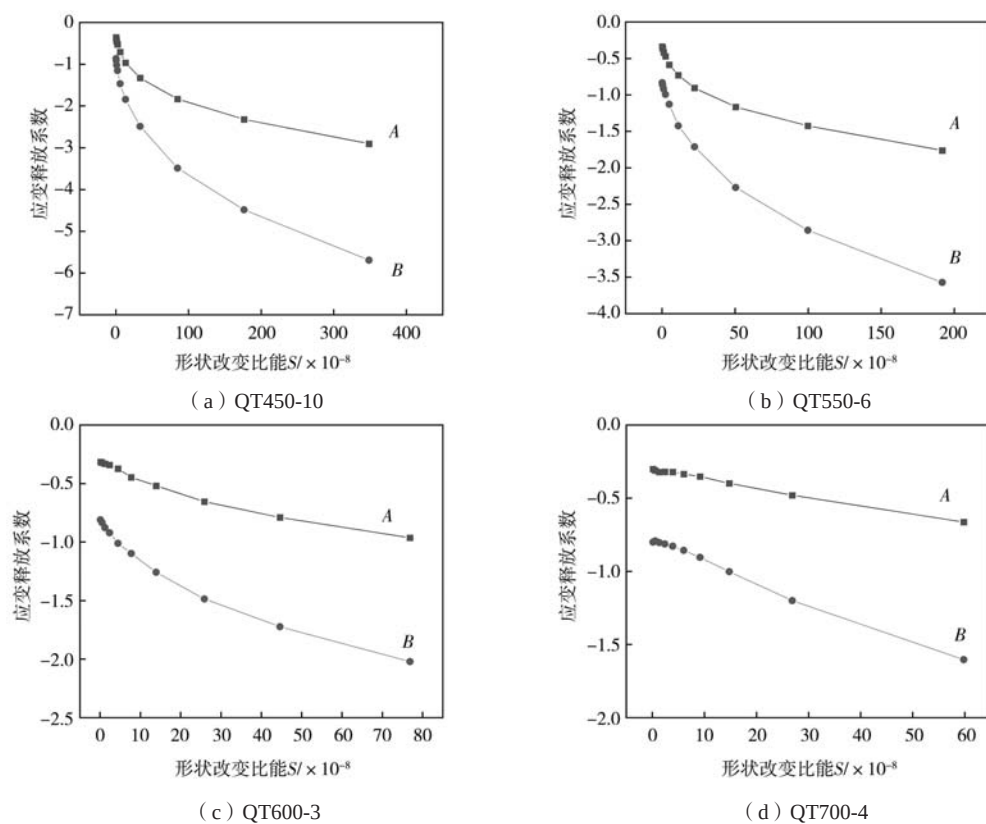
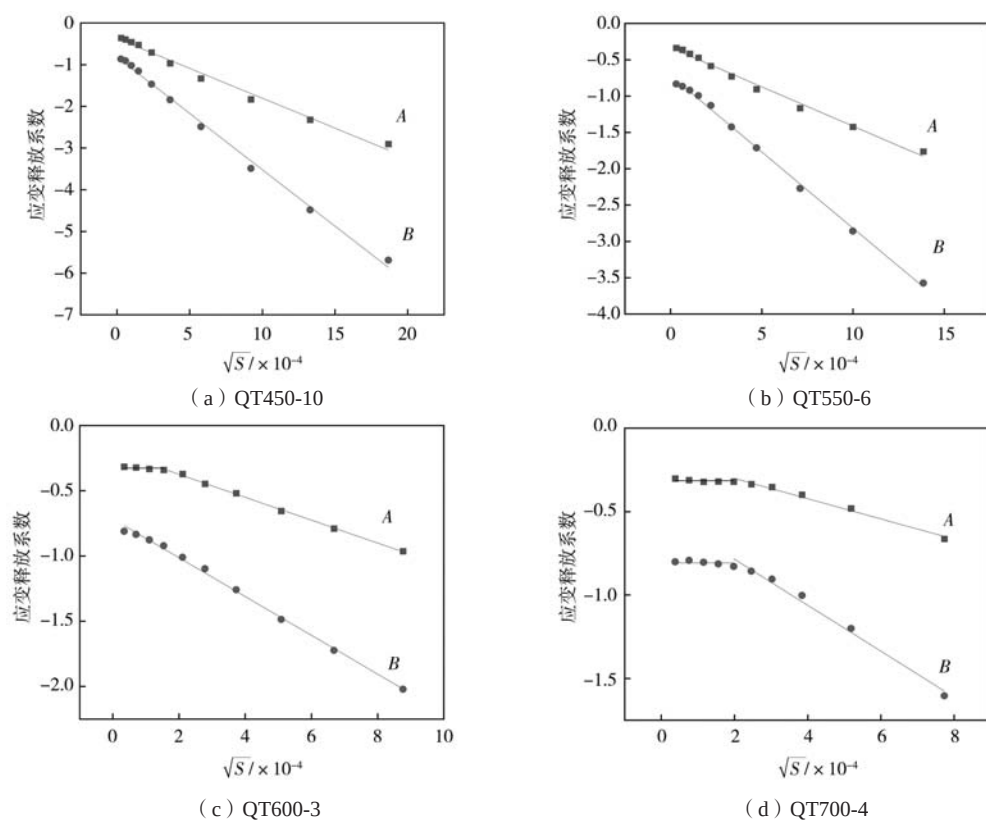


图5 形状改变比能S与应力σ间的关系

Fig. 5 The relation between shape change ratio energy S and stress σ

图6 应变释放系数与形状改变比能 S 间的关系Fig. 6 The relation between strain release coefficient and shape change ratio energy S 图7 应变释放系数与 $\sqrt{S}$ 间的关系Fig. 7 The relation between strain release coefficient and $\sqrt{S}$

QT550-6:

$$\begin{cases} A = -0.1081\sqrt{S} - 0.3320 \\ B = -0.2098\sqrt{S} - 0.7188 \end{cases} \quad (10)$$

QT600-3:

$$\begin{cases} A = \begin{cases} -0.3270\sqrt{S} (10^{-4}) \leq 1.5363 \\ -0.0878\sqrt{S} - 0.1987\sqrt{S} (10^{-4}) > 1.5363 \end{cases} \\ B = -0.1486\sqrt{S} - 0.7159 \end{cases} \quad (11)$$

QT700-4:

$$\begin{cases} A = \begin{cases} -0.3145\sqrt{S} (10^{-4}) \leq 1.9772 \\ -0.0606\sqrt{S} - 0.1800\sqrt{S} (10^{-4}) > 1.9772 \end{cases} \\ B = \begin{cases} -0.8073\sqrt{S} (10^{-4}) \leq 1.9772 \\ -0.1379\sqrt{S} - 0.5095\sqrt{S} (10^{-4}) > 1.9772 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

在盲孔法测试球墨铸铁残余应力的过程中, 首先采用应变值 ε_1 、 ε_3 , 代入公式(7), 就可以获得形状改变比能 S 的值, 然后根据上述材料对应的公式, 可以获得精确的 A 、 B 值, 再将 A 、 B 值代入公式(1)就可以得到残余应力。

3 结论

(1) 使用盲孔法对系列典型球墨铸铁QT450-10、QT550-6、QT600-3和QT700-4的应变释放系数进行了标定, 得到四种典型球墨铸铁应变释放系数与应力的关系曲线, 发现随标定应力的增大, 各牌号球墨铸铁的应变释放系数均有不同程度的减小。

(2) 在较小的标定应力下($0.1\sigma_b$)四种牌号球墨铸铁的应变释放系数基本一致, 随应力增大, 越低牌号的球墨铸铁的应变释放系数受塑性变形影响越大, 其应变释放系数随应力增大而降低幅度越大, 在 $0.5\sigma_b$ 的标定应力下QT450-10和QT700-4的应变释放系数 A 分别为-2.902 63、-0.662 71, 应变释放系数 B 分别为-5.689 89、-1.603 94。

(3) 对四种典型球墨铸铁的应变释放系数 A 、 B 进行了塑性修正, 发现球墨铸铁应变释放系数与 $\sqrt{S}$ 之间具有较好的线性关系, 通过数值拟合得到应变释放系数关于 $\sqrt{S} (10^{-4})$ 的修正公式, 可以直接用于相关铸铁产品残余应力的检测。

参考文献:

- [1] 郝石坚, 宋绪丁. 球墨铸铁: Ductile cast iron [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [2] 盛达. 球墨铸铁工业生产60年的发展 [J]. 现代铸铁, 2009, 29 (2): 56-60.
- [3] DAMJANOVIĆ D, KOZAK D, GUBELJAK N. The influence of residual stresses on fracture behavior of Pipe Ring Notched Bend specimen (PRNB) [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 205: 347-358.
- [4] KASVAYEE K A, GHASSEMALI E, SALOMONSSON K, et al. Strain localization and crack formation effects on stress-strain response of ductile iron [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 702: 265-271.
- [5] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components [J]. Materials and Design, 2011, 35: 572-588.
- [6] ZHAO Q, CHEN K, CHEN M, et al. Use of plastic correction formula to improve accuracy of welding residual stress test with blind-hole method [J]. Transactions of Tianjin University, 2017, 24 (5): 480-488.
- [7] 金希红, 曾燕军, 刘恒, 等. 不同残余应力测试方法与数值模拟对比研究 [J]. 焊接技术, 2022, 51 (1): 24-27+113-114.
- [8] 汪友路, 钱冬冬, 解明国, 等. 盲孔法测量QT700材料应变释放系数的研究 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (6): 462-467.
- [9] QIANG B, LI Y, YAO C, et al. Through-thickness distribution of residual stresses in Q345qD butt-welded steel plates [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 54-64.
- [10] 施刚, 张紫干, 陈学森, 等. 带焊接端板Q420大规格角钢残余应力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020 (S2): 374-381.
- [11] 李洋, 雷宏刚. 基于盲孔法的网架焊接空心球节点球面焊趾处残余应力测试 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (7): 2816-2822.
- [12] ASTM E837-81, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method [S]. Philadelphia: ASTM, 1995.
- [13] 钱海盛, 张宇, 郭汉德, 等. 盲孔法测量HT300铸件残余应力的应变释放系数研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (19): 80-83+86.
- [14] 张壮南, 王元鸷, 田路. Q345B钢焊接残余应力应变释放系数有限元分析 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37 (S1): 393-398.
- [15] 印兵胜, 赵怀普, 王晓洪. 残余应力测定的基本知识——第七讲机械法测残余应力 [J]. 理化检验 (物理分册), 2007 (12): 642-645, 641.
- [16] BARBER J R. Solid mechanics and its applications: elasticity [M]. Netherlands: Kluwer academic publishers, 2013.

- [17] 刘晓红, 苏文桂, 张运泉, 等. 屈服状态下盲孔法测量残余应力孔边应变释放系数修正 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (1) : 36-39.
- [18] 陈明祥. 弹塑性力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] ZHAO Q, CHEN K, CHEN M, et al. Use of plastic correction formula to improve accuracy of welding residual stress test with blind-hole method [J]. Transactions of Tianjin University, 2017, 24 (5) : 480-488.
- [20] 苏礼季, 周广涛, 刘红生. 盲孔法测LY12铝合金焊接残余应力时应变释放系数的标定及塑性修正 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (4) : 48-53.
- [21] 侯海量, 朱锡, 刘润泉. 盲孔法测量921A钢焊接残余应力的应变释放系数研究 [J]. 船舶工程, 2003, 25 (1) : 57-60.

Study on Strain Release Coefficients and Its Plasticity Correction for Four Typical Ductile Iron

WANG You-lu¹, QIAN Dong-dong², LIU Ai-jun¹, XIE Ming-guo², ZHANG Xue-bin¹

(1. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Hefei Casting and Forging Factory, Anhui Heli Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract:

The blind hole method is the most common method for measuring residual stresses in engineering, in which the strain release coefficient of the material is the key parameter in the method, and there are relatively few studies on the strain release coefficient of ductile iron at home and abroad. In this paper, the strain release coefficients of four commonly used ductile iron QT450-10, QT550-6, QT600-3 and QT700-4 were calibrated by the blind hole method, and the relationship curves between strain release coefficients and stresses were obtained. It was found that the lower grades of ductile iron are more sensitive to stress concentration due to the high ferrite content, and are prone to local plastic deformation in the calibration test. The strain release coefficients of the four ductile irons were corrected using a correction method based on the shape change ratio S . It was found that, unlike other homogeneous metallic materials, there was a good linear relationship between the strain release coefficients and $\sqrt{S}$ for ductile irons, so the correction formula for the strain release coefficients of ductile irons with respect to $\sqrt{S}$ was proposed, which can be directly applied to the measurement of residual stresses in ductile irons by the blind hole method.

Key words:

ductile iron; strain release coefficient; blind hole method; residual stress; plasticity correction